

## ABSTRACT

*Deflection method is conducted splitting the specimen at its axis. Because of splitting, the plate is not static equilibrium. To reach the new static equilibrium state the plate will deflect. The amount of deflection is comparable with the residual stress exerted on its surface.*

*X-Ray diffraction method uses the loan distance changes as a strain gauge. If the residual stresses on material exist, the atomic distance changes will be taken place and make a top angle fraction change.*

## PENDAHULUAN

Tegangan sisa (**residual stress**) adalah tegangan yang masih bekerja pada suatu benda meskipun beban luar yang bekerja pada benda tersebut telah dihilangkan. Berdasarkan arahnya, tegangan sisa dapat dibagi menjadi dua, yaitu : tegangan sisa tarik dan sisa tekan.

Kedua tegangan itu selalu berada pada kondisi seimbang statik, artinya penjumlahan gaya akibat kedua tegangan tersebut selalu sama dengan nol. Tegangan sisa dapat berpengaruh terhadap sifat material, terutama ketahanan korosi dan umur lelah (**fatigue lives**). Tegangan sisa tekan pada permukaan akan meningkatkan ketahanan korosi tegangan (**stress corrosion**) dan umur lelah, sedangkan tegangan sisa tarik berakibat sebaliknya.

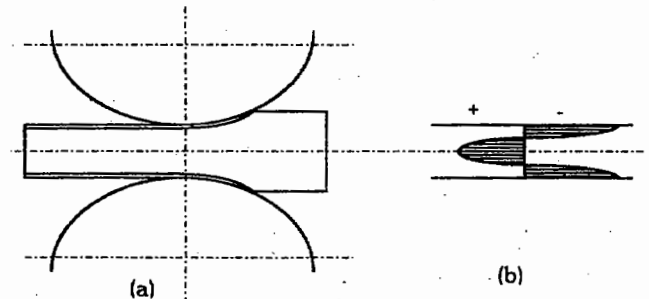
Secara umum tegangan sisa pada suatu benda dapat disebabkan oleh :

1. Pengerjaan dingin (**cold working**)
2. Pemanasan dan pendinginan (misal : pada peristiwa pengelasan)
3. penambahan unsur paduan (**alloy**)

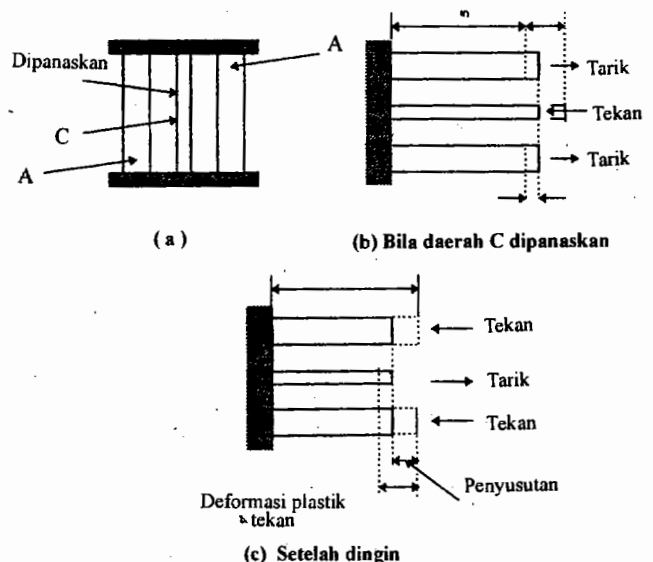
Semua pengerjaan dingin seperti pengerolan (**rolling**), penarikan kawat (**wire drawing**), **deep drawing** dan lainnya dapat menimbulkan tegangan sisa. Secara umum tegangan sisa yang terjadi akibat proses pengerjaan dingin disebabkan oleh adanya deformasi plastis yang tidak seragam. Untuk menjelaskan terbentuknya tegangan sisa pada proses pengerjaan dingin, dapat dilihat pada kasus proses pengerolan. Untuk pengerolan dengan reduksi yang sangat kecil ( $\epsilon < 1\%$ ), bagian luar akan mengalami deformasi sedangkan bagian dalam tidak mengalami deformasi (Gambar 1a). Oleh karena itu bagian dalam akan mengalami tegangan tarik dan bagian luar akan mengalami tegangan tekan (gambar 1b).

Terjadinya tegangan sisa ini dapat dilihat pada gambar 2, di mana daerah C mengembang pada waktu pengelasan. Pengembangan pada C ditahan oleh daerah A, sehingga pada daerah C terjadi tegangan tekan dan pada daerah A terjadi tegangan tarik. Tetapi bila daerah A lebih luas dari C, maka pada daerah C akan terjadi perubahan bentuk tetap, sedangkan daerah A terjadi

perubahan bentuk elastik. Pada waktu pengelasan selesai, terjadilah proses pendinginan di mana bagian C menyusut cukup besar disamping karena pendinginan juga karena adanya tegangan tekan. Penyusutan ini ditahan oleh daerah A, karena itu pada daerah C akan terjadi tegangan tarik yang diimbangi oleh tegangan tekan pada daerah A.



Gambar 1. Pengerolan dengan reduksi  $< 1\%$   
a. Daerah deformasi  
b. Kondisi tegangan sisa



Gambar 2. Pembentukan tegangan sisa

\*) Ir. Bagas Pujilaksono, Dosen Jurusan Teknik Nuklir Fakultas Teknik UGM

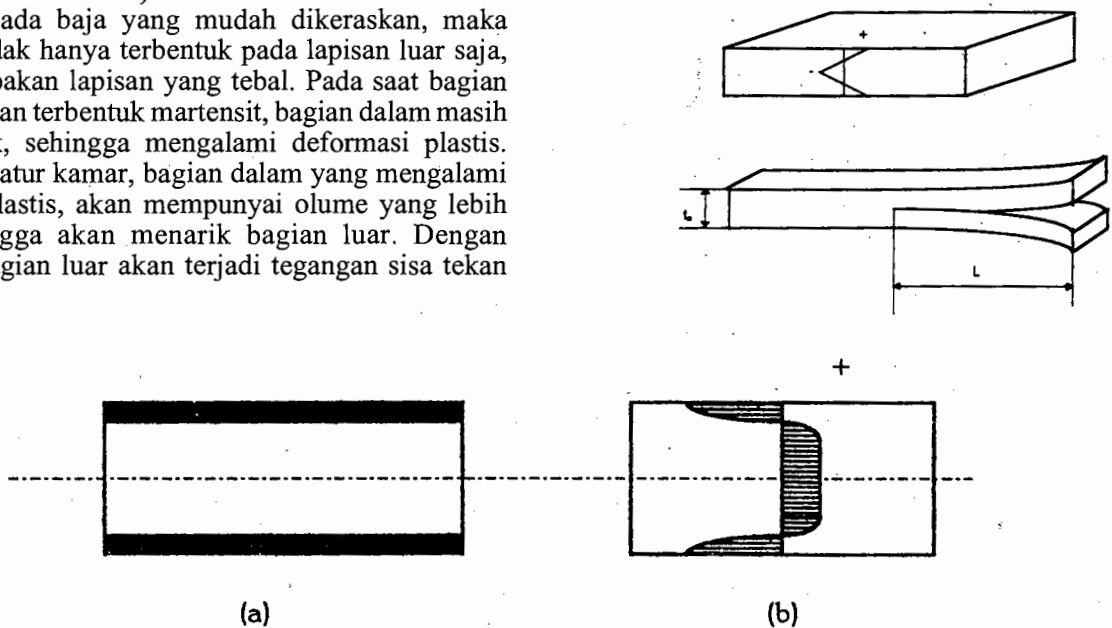
Tegangan sisa yang terjadi akibat penambahan unsur paduan pada dasarnya terjadi karena adanya difusi unsur paduan yang menyebabkan terjadi perubahan volume pada daerah yang banyak mengandung unsur paduan. Misalnya pada proses carburizing, atom-atom C yang ditambahkan dari luar akan berdifusi ke dalam permukaan (Gambar 3a). Jika dicelup cepat, difusi atom C akan menyebabkan terbentuknya martensit yang mempunyai struktur BCT. Karena martensit hanya terbentuk pada lapisan tipis dekat permukaan saja, maka bagian luar yang berubah volumenya akan menarik bagian dalam. Karena itu bagian dalam akan mengalami tegangan sisa tarik dan bagian luar mengalami tegangan sisa tekan (Gambar 3b). Jika transformasi martensit dilakukan pada baja yang mudah dikeraskan, maka martensit tidak hanya terbentuk pada lapisan luar saja, tetapi merupakan lapisan yang tebal. Pada saat bagian luar dingin dan terbentuk martensit, bagian dalam masih relatif lunak, sehingga mengalami deformasi plastis. Pada temperatur kamar, bagian dalam yang mengalami deformasi plastis, akan mempunyai volume yang lebih kecil, sehingga akan menarik bagian luar. Dengan demikian bagian luar akan terjadi tegangan sisa tekan (Gambar 4).

## METODE DEFLEKSI

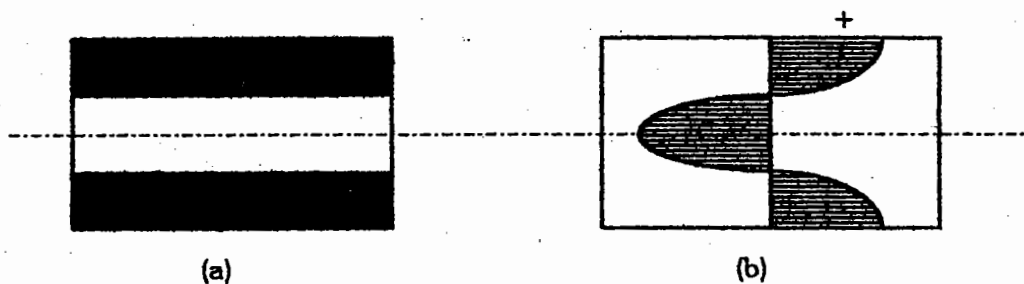
Anggapan yang diambil dalam metode defleksi adalah :

1. Sifat elastisnya homogen
2. Tegangan sisa dalam arah bidang konstan, variasi tegangan hanya terjadi dalam arah tebal dan distribusinya linier.

Untuk menganalisa metode ini, maka diambil sebagai contoh plat yang telah mengalami pengerolan dingin. Distribusi tegangan sisa dalam pelat diasumsikan linier.



Gambar 3. Tegangan sisa akibat penambahan unsur paduan  
a. Difusi unsur paduan, b. Kondisi tegangan sisa

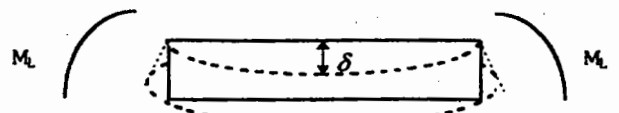


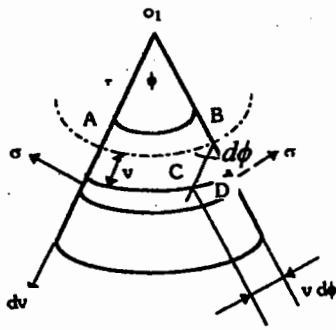
Gambar 4. Tegangan sisa akibat transformasi martensit pada baja yang mudah dikeraskan  
a. Daerah deformasi, b. Kondisi tegangan sisa

## TINJAUAN PUSTAKA

Pengukuran tegangan sisa dapat dilakukan secara matematis atau eksperimen. Cara matematis atau numerik cukup sulit dilakukan. Untuk bentuk yang rumit, tingkat kesulitannya akan bertambah. Secara eksperimen dikenal dua metode pengukuran yaitu metode merusak dan metode tidak merusak. Salah satu cara dari metode merusak adalah metode defleksi.

Untuk menghitung momen yang terjadi akibat pelepasan tegangan sisa tersebut, maka diambil penyederhanaan suatu pelat yang mengalami beban lentur sebagai berikut :





$O_1$  = Titik pusat kelengkungan  
 $d\phi$  = sudut potongan elemen  $dx$   
 $r$  = radius kelengkungan

Gambar 5. Beban lentur pada pelat elemen kecil  $dx$

Dari gambar 5 di atas dibuat garis  $BC \parallel$  garis  $O_1A$ , sehingga  $\angle AO_1B = \angle BCD = d\phi$ , dari persamaan kesebangunan berlaku :

$$\frac{v}{r} = v \frac{d\phi}{dx} \quad 1)$$

di mana  $v \frac{d\phi}{dx}$  adalah sama dengan regangan  $e$ , sehingga persamaan 1) sama dengan  $e$ . Jadi perpanjangan bervariasi dengan jarak  $v$  terhadap sumbu netral. Karena material masih dalam daerah elastis maka hukum Hooke masih berlaku :

$$\sigma = E \cdot e \quad 2)$$

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{v}{r} \rightarrow \sigma = v \frac{E}{r} \quad 3)$$

Jadi tegangan juga bervariasi terhadap  $v$  dan sumbu netral. Untuk menghitung momen didapat dari perkalian antara gaya pada elemen  $dx$ , yaitu  $\sigma \cdot dA$  dengan jarak  $v$  terhadap sumbu netral.

$$\begin{aligned}
 M &= \int (\sigma \cdot dA) \cdot v \\
 &= \int \frac{E}{r} v^2 \cdot dA = \frac{E}{r} \int v^2 \cdot dA
 \end{aligned} \quad 4)$$

di mana besaran  $\int v^2 \cdot dA$  adalah momen inersia penampang,  $I$  sehingga :

$$M = \frac{E \cdot I}{r} \quad 5)$$

Jika radius  $r$  dieliminasi dalam persamaan 3 maka didapat persamaan 6. Persamaan 6 adalah tegangan lentur pada jarak  $v$  terhadap sumbu netral. Dengan

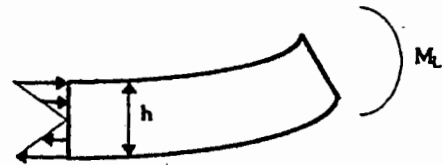
mengambil asumsi distribusi tegangan linier, maka tegangan maksimum bekerja pada permukaan, yaitu :

$$\sigma = \frac{M \cdot v}{I} \quad 6)$$

$$\sigma = \frac{M \cdot c}{I} \quad 7)$$

di mana :

$c$  = jarak antara sumbu netral terhadap titik terluar

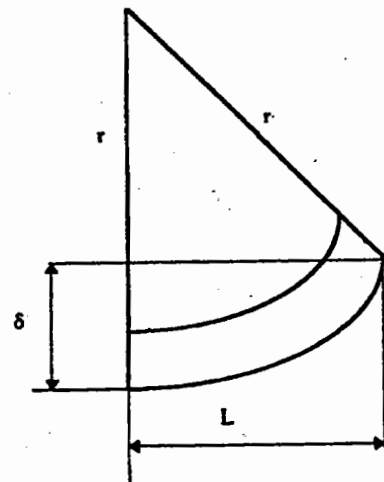


Gambar 6. Distribusi tegangan sepanjang  $h$

Substitusikan persamaan 5 dan 7, maka diperoleh

$$\sigma = \frac{E \cdot t}{4r} \quad 8)$$

radius kelengkungan  $r$ , dapat dihitung dengan mengukur lendutan  $\delta$  jauh lebih kecil bila dibandingkan dengan  $r$ , maka berlaku hubungan :



Gambar. 7. Hubungan antara  $L$ ,  $r$ ,  $\delta$

dari hubungan geometris di atas maka :

$$(r - \delta)^2 - L^2 = r^2 \quad 9)$$

$$r^2 + \delta^2 - 2r\delta + L^2 = r^2 \quad 10)$$

karena  $\delta$  kecil sekali, maka  $\delta^2$  dapat diabaikan, sehingga persamaan menjadi :

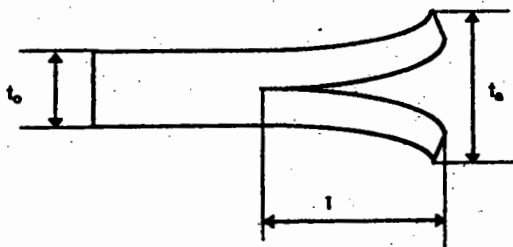
$$L^2 = 2r \cdot \delta \quad (11)$$

$$r = \frac{L^2}{2\delta} \quad (12)$$

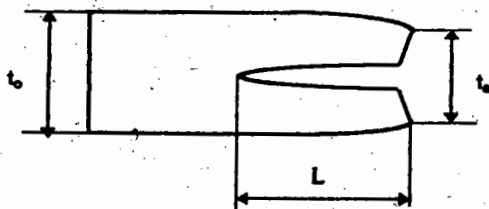
Pada akhirnya tegangan yang bekerja pada permukaan dalam arah longitudinal dapat dihitung dengan persamaan

$$\sigma = \frac{E' \cdot t \cdot \delta}{2 L^2} \quad (13)$$

Dimensi yang perlu diukur pada pelat setelah dibelah adalah panjang pembelahan ( $L$ ), lendutan ( $\delta$ ) dan tebal ( $t$ ). Alat ukur yang digunakan adalah jangka sorong dan mikrometer.



$$\delta = \frac{t_a - t_o}{2}$$



$$\delta = \frac{t_o - t_a}{2}$$

Tegangan sisa yang bekerja di permukaan dapat dihitung dengan menggunakan persamaan berikut :

$$\sigma = \frac{E' \cdot t \cdot \delta}{2 L^2} \quad (14)$$

di mana :  $E = \frac{E}{(1 - \nu^2)}$

$\nu$  = poisson ratio

$E$  = modulus elastisitas bahan

## METODE DIFRAKSI SINAR-X

Pengukuran tegangan sisa dengan difraksi sinar-X memanfaatkan perubahan jarak antar bidang sebagai *strain gauge*. Jika terdapat tegangan sisa pada material, maka akan terjadi perubahan jarak antar atom, sehingga akan menyebabkan terjadinya perubahan sudut puncak difraksi.

Hubungan antara jarak bidang atom dan sudut puncak dinyatakan dengan hubungan Bragg :

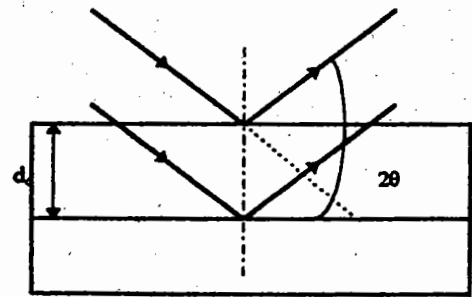
$$n \cdot \lambda = 2 \cdot d \cdot \sin \theta \quad (15)$$

di mana :

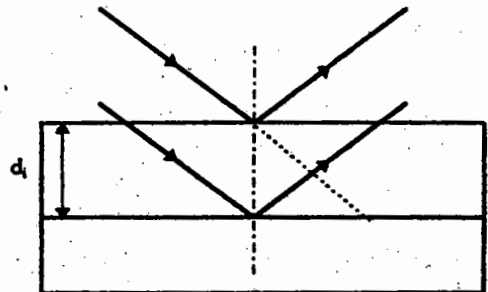
$\lambda$  = panjang gelombang sinar-X

$d$  = jarak antar bidang atom

$\theta$  = sudut Bragg



a. Material tanpa tegangan

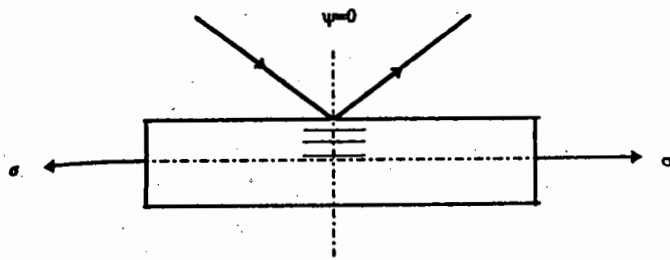


b. Material mempunyai tegangan

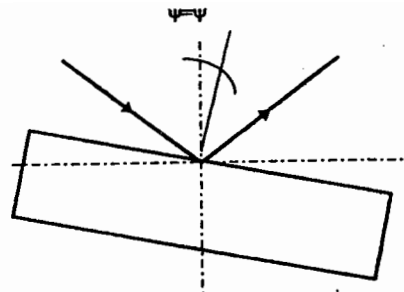
Gambar 8. Hubungan jarak antar bidang atom ( $d$ ) dan sudut difraksi ( $\theta$ )

Gambar 9 memperlihatkan bahwa difraksi pada suatu material yang mempunyai tegangan, sudut  $\psi$  adalah sudut yang terbentuk antar garis normal dan garis bagi sinar datang dan sinar-X.

Pada orientasi  $\psi = 0$  di mana permukaan bidang yang diukur sejajar dengan permukaan spesimen, adanya tegangan menyebabkan pengurangan jarak antar bidang atom karena adanya *poisson ratio*, sehingga menyebabkan adanya kenaikan sudut puncak.



a. Pengukuran pada  $\psi = 0$

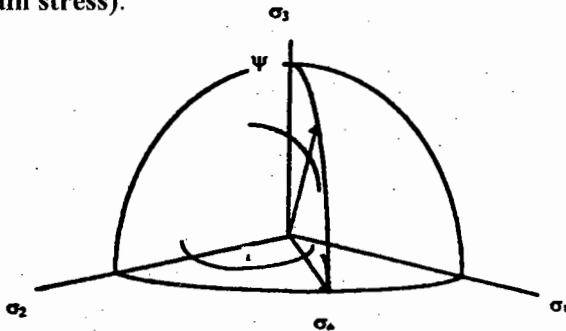


b. Pengukuran pada  $\psi = \psi$

Gambar 9. Pengukuran jarak antar bidang atom pada  $\psi$  yang berbeda

Pengukuran sudut difraksi pada minimum dua sudut  $\psi$  memungkinkan perhatian tegangan yang terdapat pada permukaan material.

Pengukuran tegangan sisa dengan XRD terbatas pada permukaan material karena penetrasi sinar-X pada material hanya terbatas 0.025 mm. Pada permukaan diasumsikan kondisi tegangan berupa tegangan bidang (plain stress).



Gambar 10. Hubungan tegangan-regangan

Pada kondisi ini, tegangan digambarkan oleh tegangan utama  $\sigma_1$  dan  $\sigma_2$  dan tegangan normal permukaan dianggap tidak ada  $\sigma_3 = 0$

Untuk mengukur tegangan pada material dilakukan pendekatan bahwa jarak antar bidang atom untuk material yang bebas tegangan  $d_0$  tidak diketahui, dipakai persamaan :

$$\sigma_{\psi} = \left( \frac{E}{1 + \nu} \right)_{hkl} \cdot \frac{1}{d_{\psi}} \cdot \left( \frac{\delta \cdot d_{\psi}}{\delta \cdot \sin^2 \psi} \right) \quad (16)$$

## HASIL DAN PEMBAHASAN

Tabel 1. Tegangan Sisa dengan Metode Defleksi

Reduksi penampang	$T_0$ (mm)	$T_a$ (mm)	Defleksi (mm)	L (mm)	Tegangan (MPa)
10%	6,39	6,27	0,06	19,42	+115,468
20%	5,68	5,54	0,07	17,84	+137,868
30%	4,97	4,79	0,09	15,58	+200,950
40%	4,26	4,10	0,08	12,20	+308,639

Tabel 2. Tegangan Sisa dengan Metode Difraksi Sinar-X

Reduksi 10%			
$\psi$	$\sin^2(\psi)$	Jarak antar bidang atom	$\sigma$ (XRD)
0	0	1,435771	+ 18,945
5	0,0075961	1,436339	+ 18,937
10	0,0301540	1,436909	+ 18,930
15	0,0066987	1,436529	+ 18,935
20	0,1169780	1,436150	+ 18,940
25	0,1786060	1,436339	+ 19,937
$\sigma = + 18,937$			SD = 0,005

Reduksi 20%			
0	0	1,435771	+ 26,025
5	0,0075961	1,436719	+ 26,008
10	0,0301540	1,436150	+ 26,018
15	0,0066987	1,436592	+ 26,012
20	0,1169780	1,437479	+ 25,994
25	0,1786060	1,436339	+ 26,029
$\sigma = +26,014$			SD = 0,013

Reduksi 30%			
0	0	1,436529	+ 174,971
5	0,0075961	1,436719	+ 174,948
10	0,0301540	1,436960	+ 175,040
15	0,0066987	1,436529	+ 174,971
20	0,1169780	1,436710	+ 174,901
25	0,1786060	1,436719	+ 174,948
$\sigma = + 174,963$			SD = 0,045

Reduksi 40%			
0	0	1,436529	+ 241,281
5	0,0075961	1,435582	+ 241,441
10	0,0301540	1,436909	+ 241,218
15	0,0066987	1,438431	+ 240,962
20	0,1169780	1,436529	+ 241,281
25	0,1786060	1,436719	+ 241,250
$\sigma = + 241,239$			SD = 0,156

Dari pengukuran dengan metoda defleksi diperoleh besarnya tegangan sisa seperti pada tabel 1, di mana dengan bertambahnya reduksi penampang, tegangan sisa yang bekerja juga semakin besar. Hal ini dikarenakan tegangan sisa berbanding lurus dengan tegangan yang bekerja pada pelat.

Faktor yang mempengaruhi arah dan besar lendutan pada pelat adalah besar serta distribusi tegangan sisa yang bekerja di dalam pelat. Arah lendutan yang terjadi dapat dianalisa sebagai berikut : distribusi tegangan sisa setelah dibelah dapat dilihat pada gambar 11a, dengan anggapan bahwa pelat belum melendut. Kondisi tegangan tersebut tidak berada pada kesetimbangan statik, yaitu momennya tidak sama dengan nol. Untuk mencapai kesetimbangan statik jumlah gaya dan momen yang bekerja pada pelat harus sama dengan nol, maka pelat tersebut akan melendut atau mengalami deformasi plastis. Akibat lendutan tersebut pelat seolah-olah menerima beban momen, dan arahnya merupakan kebalikan dari momen yang bekerja pada pelat. Distribusi tegangan pada pelat dapat dilihat pada gambar 11b.

## KESIMPULAN

Semakin besar reduksi yang diberikan tegangan sisa yang dihasilkan semakin besar.

Dari hasil pengukuran tegangan sisa yang didapat adalah sebagai berikut :

Metode defleksi	: 115,468 - 308,639 MPa
Metode difraksi	: 18,937 - 241,239 MPa

## DAFTAR PUSTAKA

- Dieter, G.E., *Mechanical Metallurgy*, Mc Graw-Hill, New York, 1968.
- Cullity, B.D., *Element of X-Ray Diffraction*, Reading, Mass., 1976.
- Honeycombe, R.W.K., *Plastic Deformation of Metals*, 2nd edition, Edward Arnold London, 1984.
- Muldjoadi, *Metoda Pengukuran Tegangan Sisa dengan Cara Destruktif, Tugas Akhir*, Jurusan T-Mesin ITB, 1985
- Wirjosumarto H., Okumura T., *Teknologi Pengelasan Logam*, PT. Pradnya Paramita, 1991

